第 37 卷第 12 期
2017 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.12
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201611192354

张雪梅,王克林,岳跃民,童晓伟,廖楚杰,张明阳,姜岩.生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性.生态学报,2017,37(12):4008-4018.

Zhang X M, Wang K L, Yue Y M, Tong X W, Liao C J, Zhang M Y, Jiang Y. Factors impacting on vegetation dynamics and spatial non-stationary relationships in karst regions of southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 4008-4018.

生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性

张雪梅[1,2,3],王克林[1,2,*],岳跃民[1,2],童晓伟[1,2,3],廖楚杰[1,2,3],张明阳[1,2],姜 岩[4]

1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125
2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,环江 547100
3 中国科学院大学,北京 100049
4 成都理工大学地球科学学院,成都 610059

摘要:我国西南喀斯特地区石漠化面积已实现净减少,植被状况具有明显改善。为了更清晰的了解该区植被变化情况及其影响因素的区域差异,采用长时间序列遥感数据,综合运用空间自相关分析、主成分分析(PCA)和地理加权回归(GWR)等研究方法,分析生态工程实施以来滇桂黔喀斯特植被变化及其主要影响因素的空间非平稳性。结果表明:与 1982—2000 年相比,2001—2011 年生长季归一化植被指数(GSN)在整个研究区域都有增加且具有显著的空间集聚性(I_g 为 0.90),但增加程度在空间上具有差异性(变异系数为 43%);影响滇桂黔植被变化的主要因素包括气候因子、土壤质地、人类活动、水分有效性、土壤养分和社会经济条件,且对植被变化的影响程度随地理位置的变化而变化。不同工程地貌类型区内,影响植被变化的主导因素不同,且存在显著的空间差异性,需综合考虑植被变化主导因素的区域差异来调整或改进后续生态工程措施。

关键词:滇桂黔;植被变化;地理加权回归;空间非平稳性;主导因素

Factors impacting on vegetation dynamics and spatial non-stationary relationships in karst regions of southwest China

ZHANG Xuemei[1,2,3], WANG Kelin[1,2,*], YUE Yuemin[1,2], TONG Xiaowei[1,2,3], LIAO Chujie[1,2,3], ZHANG Mingyang[1,2], JIANG Yan[4]

1 *Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, the Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*
2 *Huanjiang Observation and Research Station for Karst Eco-systems, Huanjiang* 547100, *China*
3 *University of Chinese Academy of Science, Beijing* 100049, *China*
4 *Chengdu University of Technology Institute of Earth Science, Chengdu* 610059, *China*

Abstract: With the implementation of ecological restoration, the net area of rocky desertification has been reduced and vegetation coverage significantly improved in karst areas, southwest China. It is crucial to explore the trends in vegetation change and distinguish the driving forces under different karst terrain conditions. Based on the long-term time-series of GIMMS NDVI 3g images, the present study aimed to identify the vegetation changes at different spatial and temporal scales and non-stationary relationships between vegetation changes and driving forces in karst regions of Yunnan, Guangxi, and

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502400);国家自然科学基金项目(41471445, 41371418);中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)"广西喀斯特区生态系统服务提升与民生改善研究示范"(KFJ-EW-STS-092)

收稿日期:2016-11-19; **修订日期**:2017-01-19

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: kelin@ isa.ac.cn

Guizhou Provinces with a combination of spatial autocorrelation, principal component analysis (PCA), and geographically weighted regression. The results showed that from 2001 to 2011 the growing season normalized difference vegetation index (GSN) significantly increased compared to that from 1982 to 2000 in the three regions. The GSN appeared spatially assembled (the Moran's index I_g was 0.90), while the extent of increase was significantly diverse for different areas (the variable coefficient was 43%). The PCA indicated that the main driving forces of vegetation change were climatic factors, soil texture, human activities, water availability, soil nutrients, and the level of social and economic conditions. The extent of impacts of the driving forces on vegetation change varied with different geographic positions. In addition, the main driving forces were spatially different under different karst landforms. Our study indicated that the differences of vegetation driving forces should be taken into consideration during future implementation of ecological restoration under different karst landforms.

Key Words: karst region; vegetation dynamics; GWR model; spatial non-stationary; dominant factors

为遏制石漠化土地扩展、加快石漠化土地治理进程,2008 年,国务院批复了《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》,在西南 8 个省(区、直辖市)100 个石漠化严重县启动石漠化综合治理工程试点,探索石漠化综合治理的模式与途径。2014 年已扩大至 316 个县,占到全国 455 个石漠化县的 69.5%。截止 2015 年底,石漠化治理重点工程县投入中央预算内专项资金 119 亿元,石漠化土地退化趋势得到有效遏制,石漠化土地面积已实现由持续增加向"净减少"的重大转变。然而,由于喀斯特地质背景的复杂性及石漠化生态恢复过程中的不确定性,喀斯特地区石漠化治理成效在空间上具有明显差异[1-2],据 2012 年 6 月国家林业局公布的《中国石漠化状况公报》,与 2005 年相比,广西石漠化土地面积减少最多,贵州次之,云南最少。石漠化治理的核心是植被恢复,因此,研究西南喀斯特地区县域植被恢复变化,对开展喀斯特石漠化治理工程综合成效评估,改进喀斯特地区石漠化治理措施与后续工程规划具有重要现实意义。

现有研究已揭示了喀斯特地区植被增加的区域差异比较明显,在年际尺度上,西南喀斯特地区植被变化与温度和降水均无显著相关[2],在区域尺度上,气候因子(年均降水和年均温度)不是近 12 年来喀斯特生态恢复好转的主导因素[3]。生态工程的实施是导致喀斯特石漠化地区生态恢复好转的原因[4]。然而,大区域尺度,特别是作为我国石漠化集中分布的滇桂黔三省,喀斯特地貌类型复杂多样,生态建设工程实施以来植被恢复状况如何,不同喀斯特地貌类型区植被变化的主导因素存在怎样的区域差异目前尚未明确[5-7],因此,急需开展西南喀斯特地区植被变化主导因素空间非平稳性研究。

根据"地理学第一定律"[8],普通的全局模型使用的假设前提是数据本身在统计上是独立的,并呈正态分布[9],忽略了研究问题的空间效应,且估计的回归系数是一个常数,将较难识别区域尺度上因地理位置的变化而引起的喀斯特植被变化及其影响因子间关系的空间非平稳性。考虑样本空间地理位置的 GWR 模型有效改进了变量间相互关系的空间非平稳性分析,能有效克服喀斯特地区地理要素具有显著的空间异质性和空间关联性的难题。因此,本研究基于 GWR 模型,利用长时间序列遥感数据分析近 30 年来(1982—2011 年),滇桂黔三省植被变化趋势及其主导因素,解析县域尺度植被变化的空间效应与集聚性规律,揭示植被变化主导因素的空间非平稳性与区域差异,以期为后续石漠化治理工程的实施与工程成效评估提供科学依据。

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

本研究区域位于我国西南喀斯特地区的滇桂黔三省(97.81°—111.67°E,21.53°—28.93°N),是我国喀斯特地貌发育的集中分布区[10]。该区域气候温和湿润,年均降水量 1000—1600mm,降雨时空分布不均,干湿交替频繁[11-12],属亚热带季风气候区。滇桂黔地区地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,植被类型多样,主要类型有常绿针叶林、常绿阔叶林、灌丛及灌草丛等。脆弱的地质背景加上长期以来人类的不合理干扰,使研究区

内自然植被遭到破坏,土壤侵蚀严重,基岩大面积裸露,石漠化问题突出。截止 2011 年底,滇桂黔三省仍有石漠化土地面积 779.0 万 hm^2,占我国石漠化土地总面积的 64.9%,主要分布于峰林平原、峰丛洼地、岩溶高原、岩溶峡谷、断陷盆地等喀斯特地貌类型区(图 1)。

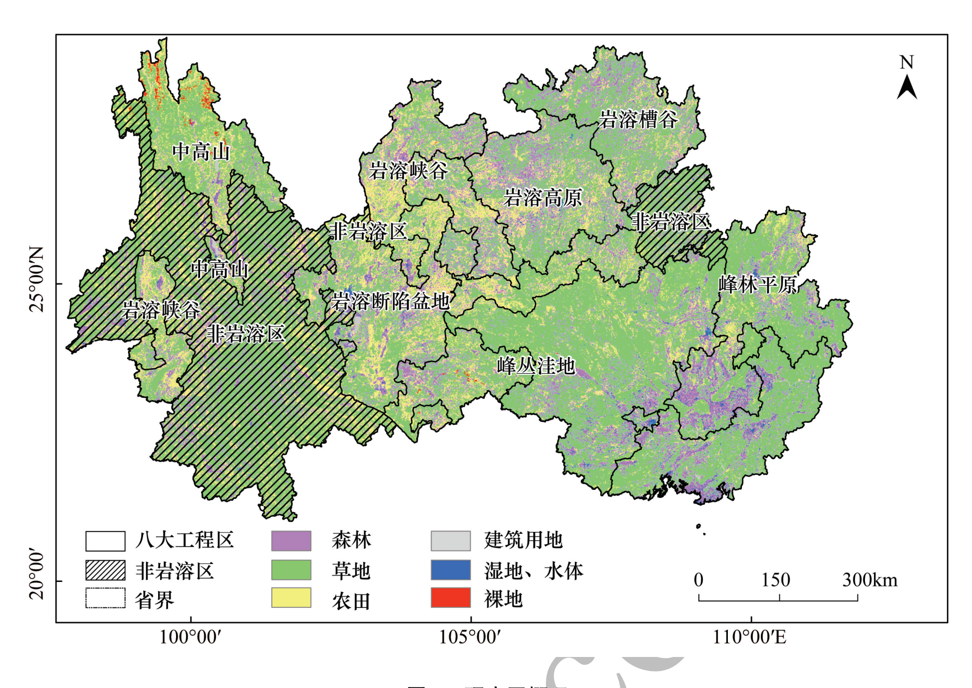


图 1 研究区概况

Fig.1 General Situation of the research area

1.2 数据来源与处理

1.2.1 NDVI 数据的获取与处理

本文 NDVI 数据采用的是 GIMMS NDVI3g 数据集产品,空间分辨率是 8km,时间分辨率 15d,从 1982—2011 年共 792 期影像。该数据集对以前的版本进行了改进与延伸,运用改进的云掩膜技术对与植被绿度无关的因子进行了校正[13]。为减少云和大气造成的噪音,将一月两次数据中的最大值作为当月 NDVI,并考虑喀斯特地区植被物候特征,将每年 4—11 月的平均值作为当年 GSN。以 2001 年作为生态工程实施节点[2],1982—2000 年为工程实施之前植被状况,2001—2011 年为工程实施后的植被状况,两个时间段的差值用来表征喀斯特地区植被变化情况,并进行归一化处理。

1.2.2 植被变化影响因素指标体系获取与处理

为了保证选取的影响因素的全面性以及县域尺度上数据的可获取性,本研究选择了与植被生长关系密切的自然因素(水、热、土、地质背景等)和人类活动因素等,共 17 个指标。具体数据来源如下:气象数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/),包括滇桂黔地区的 2001—2011 年逐年年均气温、降水、湿度指数、干燥度、积温等。本研究用县域尺度上 11a 的气象因子均值表征生态工程实施后该县的平均气候条件。2005 年和 2010 年人口密度、GDP、土地利用类型、坡度、不同植被和土壤条件下土壤有机碳等数据从中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)下载;土层厚度数据来源于寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn);退耕还林工程资金投入和造林面积数据由滇桂黔 3 省林业厅提供。退耕还林工程投入包括退耕还林投入、荒山造林投入和封山育林投入及现金补助 4 个部分。本研究中生态工程投入和造林面积为各县从 2001—2011 年的单位面积上的资金总投入及造林总面积。为确保计量单位的统一性及各因子间的可比性,本研究对以上各因素进行了归一化处理。

1.3 植被变化主导因素识别方法

1.3.1 空间自相关性分析

变量存在空间自相关性是应用 GWR 模型分析的前提条件。GSN 及其影响因素属于地理空间数据,具有

空间自相关性和空间非平稳性等特征,因而它们的空间关系可用全局空间自相关莫兰指数(I_g)和局部空间自相关莫兰指数(I_l)进行表征。

1.3.2　多重共线性分析

进行 GWR 模型回归时,如果变量间相关性程度高,出现信息重叠现象,就容易产生多重共线性问题。相关分析是判断多重共线性问题、剔除冗余变量的基本方法。如果相关系数值超过 0.8,则变量之间存在较强的相关关系[14],相关系数小于 0.8,则所选因子之间不存在多重共线性问题。本研究利用 SPSS 软件中主成分分析方法(PCA)对原始影响因子数据进行变换和处理,使原来多个相互影响的变量转换成几个互不相关的综合变量,既保留了原始影响因素的主要信息,又消除了变量间的多重共线性,得到影响植被变化的综合主导因素[15]。本研究用方差最大旋转矩阵将主成分中各变量的贡献率向最大和最小转变,使每个主成分上具有最高载荷的因子数最少,从而使得对主成分的解释更清晰[16]。

1.3.3　地理加权回归模型

空间平稳是指与地理空间关联的自变量与因变量之间不存在空间差异,即 $\beta_k(\mu, v)$ 不随自变量 x_k 位置而变化,反之则为空间不平稳[17]。空间数据一般具有空间非平稳性的特征,GWR 模型允许在不同的地理空间有不同的空间关系存在,因此它是指一种相对简单又有效的探测空间非平稳性的新方法[18]。GWR 模型最早是由 Brunsdon 等人提出[19],用于研究自变量在空间上的局部非平稳性。其具体公式如下:

$$y_i = \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{k,i} + \varepsilon_i$$

式中,β_k 指局部系数,(u_i, v_i) 为地理位置,$x_{k,i}$ 为局部因素,即 6 个主要因素,ε_i 指的是服从均值为零的独立正态分布的误差。对空间权重矩阵进行计算的权重函数选择的是高斯模型,核函数是自适应性双平方方法,最优带宽选择利用的高斯方法,利用 AICc 信息准则法确定最优带宽。将 2001—2011 年 4—11 月平均 GSN 与 1982—2000 年平均 GSN 的差值作为 GWR 模型的因变量,利用 PCA 提取主成分作为自变量,得到每个县域的影响因素的回归系数,分析单因素的空间非平稳性。回归系数绝对值越大,该因素对植被变化的影响越大;反之,越小;回归系数等于 0,两者没有关系。同时利用最小二乘方法进行全局回归分析,并对比两模型的结果。为了进一步验证各回归系数在空间上是否具有非平稳性,对各主成分的回归系数进行空间自相关分析。将每个县域回归系数绝对值最大值对应的影响因素作为影响本县植被恢复的主导因素,进一步分析主导因素的空间差异性。

2　结果分析

2.1　生态工程前后西南三省植被覆盖变化总体分析

根据西南喀斯特地区重大生态工程实施背景及 Tong 等[2]对工程实施后植被覆盖变化的突变检验分析,将西南三省植被覆盖时间变化分为工程实施前(1982—2000 年)与实施后(2001—2011 年)。相较于工程实施前,滇桂黔县域尺度平均 GSN 在工程实施后均有所增加,但增加程度在空间上具有空间差异(图 2)。空间变化上,在省域尺度,工程实施前后滇桂黔 GSN 平均增加了 0.035,其中贵州和广西 GSN 分别相对增加了 0.045和 0.043,云南 GSN 相对增加较少(0.024);生态工程前后滇桂黔三省各县平均 GSN 变化值范围介于 0.0002和 0.07 之间,且变异系数为 43%,说明各县实施生态工程后都取得成效,但各县成效有差异。

对比不同石漠化治理工程类型区 GSN 变化发现,不同石漠化治理工程类型区 GSN 呈总体增加趋势(图 3),植被增加的区域占整个研究区域的 54.3%。不同工程类型区植被变化存在一定的差异:岩溶区植被增加面积占岩溶区总面积的 55.49%;工程区中岩溶槽谷、峰林平原、岩溶高原、峰丛洼地等以植被增加为主,分别占各工程区总面积的 83.00%,78.14%,69.64%,56.76%,其中,岩溶槽谷植被增加比例最多;中高山、岩溶峡谷、岩溶断陷盆地以植被不变为主。上述结果说明近 30 年来滇桂黔 3 省植被总体呈增加趋势,生态工程的实施加快了西南三省植被覆盖的恢复速率,但不同区域、特别是不同喀斯特地貌类型区植被覆盖变化存在显著的空间差异性。

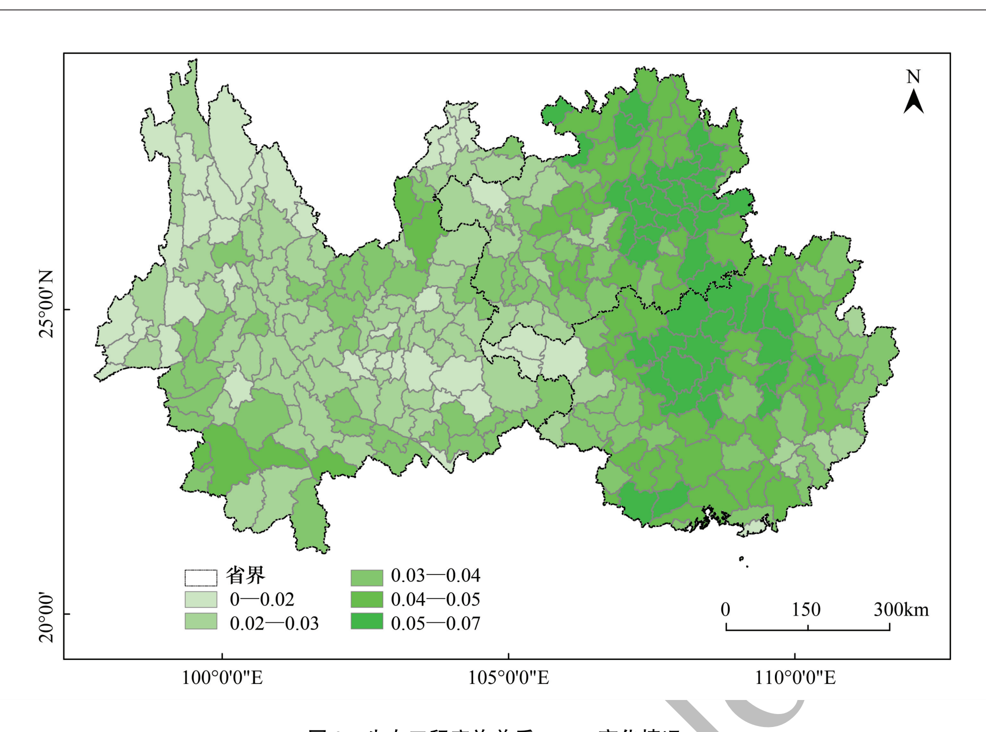


图 2 生态工程实施前后 NDVI 变化情况

Fig.2 Changes of NDVI before and after the implementation of ecological engineering projects

2.2 植被覆盖变化的空间格局差异性分析

GSN 空间自相关性检验分析显示研究区 I_g 的正态统计量 Z 值为 30.30,大于正态分布函数在 0.01 水平下的临界值 2.58, I_g 为 0.90,表明研究区 GSN 具有显著的正空间自相关性。从 I_l 空间分布(图 4)可以看出:部分岩溶槽谷、峰丛洼地和峰林平原地区呈现植被指数高值集聚,是植被密集分布区;岩溶峡谷、岩溶断陷盆地区的植被指数则呈现低值集聚,即植被覆盖较小。因此,工程实施后滇桂黔 3 省平均 GSN 在整体上具有显著的空间差异性,在局部区域上具有显著的空间集聚性。

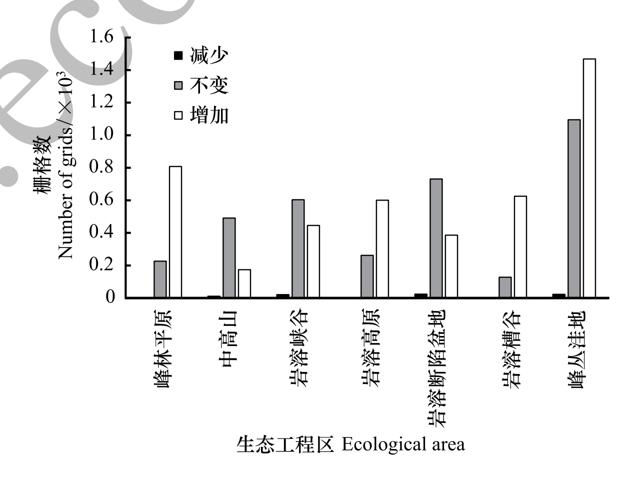


图 3 不同生态工程区植被变化情况

Fig.3 The change of NDVI in different ecological engineering area

2.3 滇桂黔植被变化的主要因素分析

剔除与植被指数增长值不显著相关的变量,利用 PCA 方法处理剩余自变量之间的多重共线性,得到影响因素的主成分分析结果和各成分的得分系数矩阵,利用旋转成分矩阵(表 1)及相关分析,可以更清晰的查看每个因素对各主成分的贡献率。每个主成分可以根据载荷较大的影响因素将主成分进行分类(表 2)。在本研究结果显示,前 6 个主成分(PCA1—PCA6)的累计贡献率为 78.33%,可较好地表征原数据[20]。以植被指数增长值作为因变量,与 6 个主成分进行 OLS 回归(表 2),结果表明 6 个主成分的方差膨胀因子都为 1.00,则 6 主成分之间不存在多重共线性。但对 OLS 多元回归的残差进行空间自相关性检验, I_g 为 0.53, Z 统计值为 17.90,说明残差在空间上都存在显著地正空间自相关性,因此需要利用 GWR 模型进一步分析影响因素的空间差异性。

2.4 不同影响因素对植被覆盖变化的空间非平稳性

2.4.1 植被变化主要影响因素的 GWR 分析

以 GSN 增长值为因变量,以对 6 个主成分作为自变量进行空间计量 GWR 分析,发现残差莫兰指数与 OLS 模型相比有所降低(I_g 为 0.11, $Z(I)$ 为 3.66)。同时结合相关性矩阵和主成分定性分析(表 3),结果显示

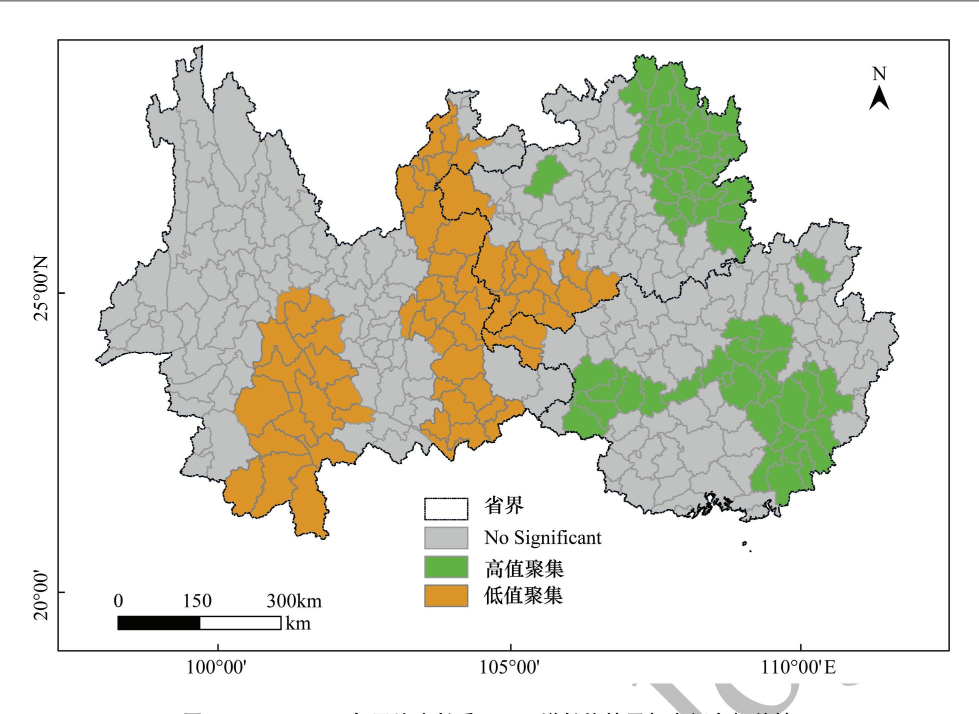


图 4　2001—2011 年平均生长季 NDVI 增长值的局部空间自相关性

Fig.4　The local spatial autocorrelation of added average growing season NDVI in 2001—2011

GWR 模型解释了 GSN 变化的 79%,远优于全局模型(R^2 = 0.23)。因此,利用 GWR 模型对喀斯特地区植被变化的影响因素进行回归分析具有合理性。

表 1　旋转成分矩阵

Table 1　Rotation component matrix

各因子贡献率 Contribution rate of each factor	6 个主成分 Six principal components					
	1	2	3	4	5	6
资金投入 Capital input	-0.02	0.12	0.88	0.08	0.14	0.04
造林面积 Afforestation area	-0.24	0.18	0.87	-0.07	-0.08	-0.08
不同土壤条件下 SOC SOC on soil type	-0.42	0.19	-0.03	0.29	0.60	-0.17
不同植被条件下 SOC SOC on grass type	0.32	-0.06	-0.02	-0.07	0.74	0.18
土壤氮储量 Soil nitrogen storage	-0.64	-0.06	-0.03	0.40	0.17	0.17
>0℃积温 >0℃ accumulated temperature	0.87	-0.27	-0.13	0.13	0.05	0.24
气温 Temperature	0.85	-0.25	-0.29	0.06	-0.03	0.10
>10℃积温 >10℃ accumulated temperature	0.88	-0.27	-0.15	0.12	0.04	0.22
人口密度 Population density	0.04	-0.29	0.47	-0.04	-0.01	0.57
国内生产总值 GDP	0.14	0.25	-0.16	0.09	0.03	0.73
坡度 Slope	-0.26	0.51	-0.07	0.08	0.02	-0.67
粘粒含量 Clay content	0.27	-0.85	-0.21	0.09	-0.20	0.020
砂粒含量 Sand content	-0.22	0.90	0.08	0.00	-0.21	0.00
粉粒含量 Silt content	-0.10	-0.06	0.25	-0.17	0.79	-0.04
干燥度 Aridity	-0.19	0.18	-0.28	0.06	-0.03	0.10
降水量 Precipitation	0.65	-0.11	-0.25	0.58	0.10	0.22
湿度指数 Humidity index	-0.08	0.11	-0.01	0.89	-0.11	-0.04

提取方法:主成份; 旋转法:具有 Kaiser 标准化的正交旋转法; *a*. 旋转在 6 次迭代后收敛

表 2 基于主成分的 OLS 模型参数估计

Table 2 PCA based Estimation Parameter Values of OLS

变量 Variables	参数估计值 Parameter estimation	标准误差 Standard error	t	方差膨胀因子 VIF[c]	主导因子 Dominant factors
常数项 Constant term	0.51	0.01	44.44		基础自然条件
PCA1	0.06	0.01	5.52	1.00	气候因子
PCA 2	0.00	0.01	-0.05	1.00	土壤质地
PCA 3	0.02	0.01	1.85	1.00	人类活动
PCA 4	0.03	0.01	2.30	1.00	水分有效性
PCA 5	0.07	0.01	6.39	1.00	土壤养分
PCA 6	0.03	0.01	2.82	1.00	社会经济条件

表 3 GWR 模型与全局回归模型拟合优度

Table 3 Comparison of coefficients of determination for the GWR and Least squared regression models

模型 Model	拟合优度 R^2	调整拟合优度 Adjusted R^2	局部拟合优度 Local R^2
地理加权回归模型 GWR	0.79	0.71	0.25—0.81
全局回归模型 OLS	0.23	0.22	

为了进一步验证各主成分回归系数在空间上是否平稳,对回归系数进行空间自相关性分析(表 4),得出 GWR 模型的各回归系数的 I_g 均大于 0,$Z(I)$ 均大于 2.58,说明在 1%显著水平下,各项系数具有显著地正空间自相关性,即这些回归系数在空间上具有空间非平稳性。因此,利用 GWR 模型可以较详细得考虑不同影响因素在不同的地理位置对植被变化的定量影响。

表 4 各因素回归系数的莫兰指数及 Z 统计量

Table 4 Moran′s I and Z Scores of regression coefficients for each factor

影响因子 Impacting factors	第一主成分 PCA1	第二主成分 PCA2	第三主成分 PCA3	第四主成分 PCA4	第五主成分 PCA5	第六主成分 PCA6
Moran′s I	0.68	0.51	0.42	0.57	0.76	0.41
Z	23.04	17.21	14.68	19.10	25.50	14.31

2.4.2 单因素对植被变化影响的空间非平稳性分析

研究区内各主成分的回归系数空间分布差异较大(图 5),各成分的回归系数既有正值,又有负值,且占样本总数的比例都较高,表明该区域各影响因素与植被变化的关系较复杂,各影响因子对植被变化影响程度具有显著的空间异质性。气候因素对植被作用程度的空间分布具有一致性,大致规律是沿云南高原、黔西山地高原、黔北山地—高原斜坡地—广西盆地的海拔梯度呈现递减特征,同时向东至峰林平原地区递增,体现了喀斯特地区水热空间分配差异明显,致使植被对水热的响应也具有空间差异。土壤质地对植被的影响有两个分布地带:在云贵高原地区大致沿长江流域和珠江流域的分水岭向两边递减,呈对称分布;在两广丘陵地区大致沿广西丘陵向广西盆地递减,体现了河流上下游的土壤质地差异。第五主成分叠加了土壤养分的影响,在岩溶区域土壤属性与植被增长以正相关关系为主,岩溶峡谷和峰林平原东部区域以负相关关系为主。

人类活动对植被具有双重作用,表现在为恢复生态环境实施的一系列生态保护与建设工程措施的正向作用和为发展社会经济水平进行的一系列不合理的生产活动的负面影响。在断陷盆地、峰丛洼地西部及峰林平原东部生态工程对植被恢复起到了促进作用,岩溶槽谷、峡谷、高原和部分峰丛洼地、峰林平原区人类活动的逆向干扰抑制了植被增长。社会经济耦合地形因素对植被生长的影响空间复杂性更高,大致沿云贵高原向广西盆地过渡的斜坡地带与植被增长呈正相关关系,并向东南方向的广西盆地区域过渡为负相关关系。这反映了人类在地形复杂的斜坡地带进行的不合理的生产活动对植被增长产生逆向干扰。

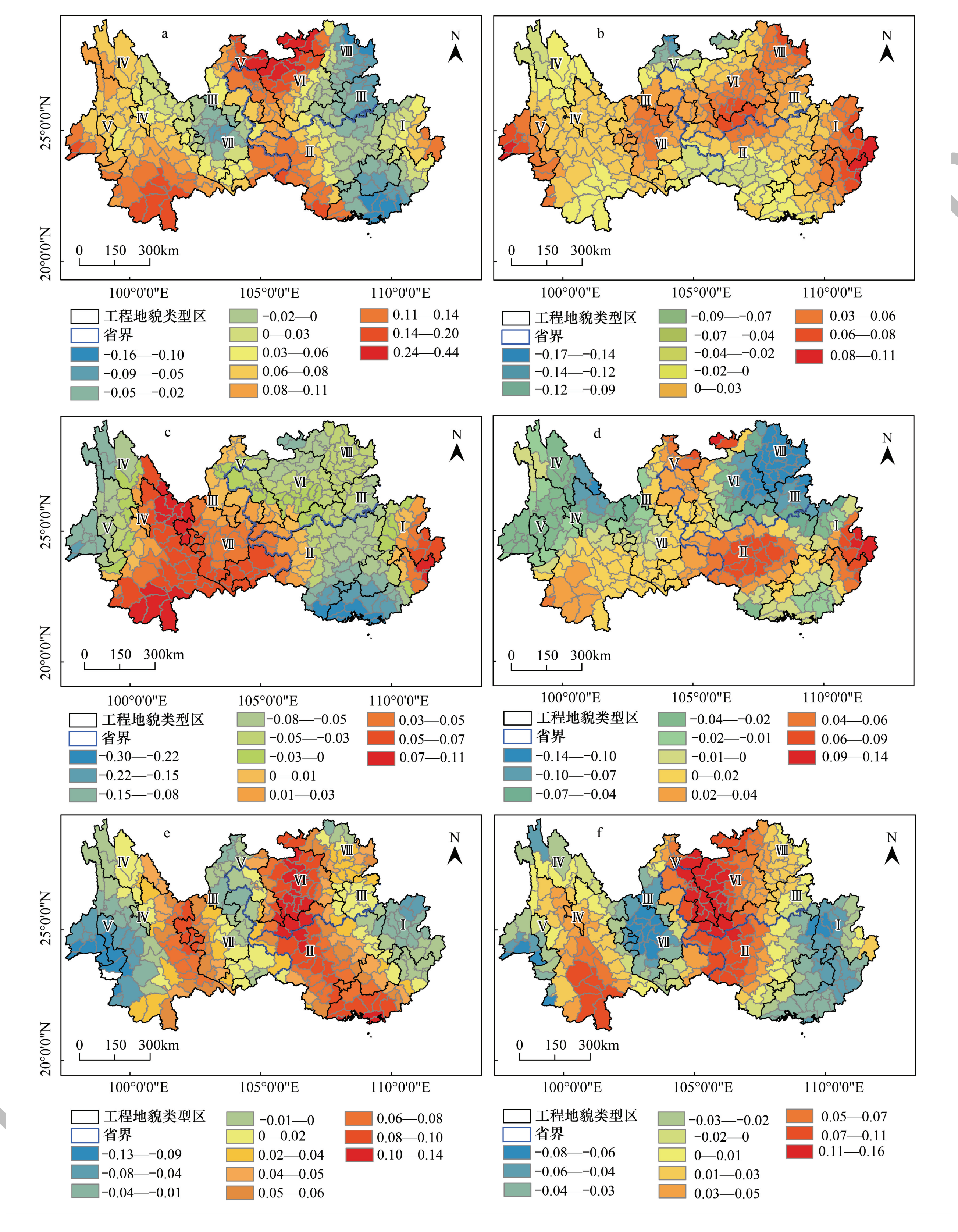


图 5　气候因子(a)、土壤质地(b)、人类活动(c)、水分有效性(d)、土壤养分(e)和社会经济条件(f)等因素对 GSN 变化的空间非平稳性

Fig.5　The spatial non-stationary of climate(a)、soil texture(b)、human activities(c)、moisture availability(d)、soil nutrients(e)、social economical condition(f) on GSN at county level

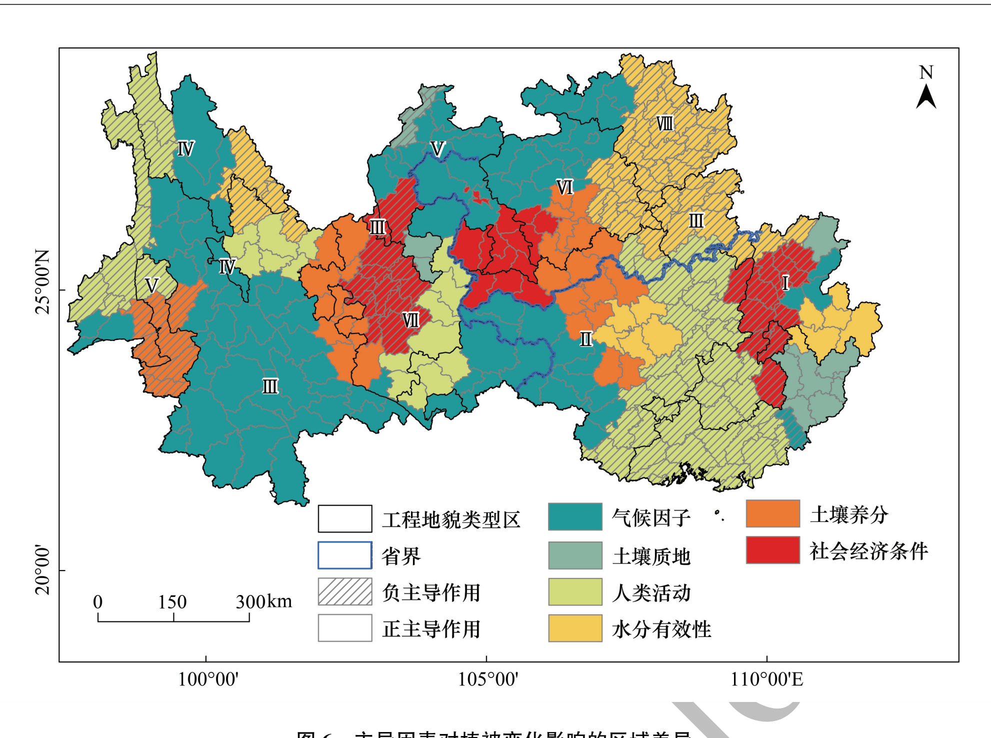


图 6 主导因素对植被变化影响的区域差异

Fig.6 Regional difference of dominant factors on vegetation dynamics

2.4.3 植被变化主导因素的空间格局分析

为了进一步分析生态工程背景下具有复杂地质背景的喀斯特地区造成植被恢复差异的原因,本研究综合以上分析的单个影响因素的空间非平稳性特征,利用 MATLAB 编程提取每个县域对植被生长影响最大的因素(图 6),发现在生态工程背景下影响植被变化的主导因素随不同喀斯特地形地貌特征的变化而变化,且各影响因子与植被变化既有正相关关系又有负相关关系。人类活动和社会经济条件是峰林平原区、断陷盆地区及滇桂黔交界的石漠化严重地区的植被变化的主导因素,而气候因素、土壤养分、水分有效性等自然因素对岩溶峡谷区、槽谷区、高原区及部分峰丛洼地区的植被变化影响均较为显著。其中,峰林平原区植被变化受社会经济条件的影响较大,峰丛洼地区受气候因素及人类活动的共同作用(部分地区植被变化也受水分有效性及土壤养分的影响),喀斯特高原区植被变化受气候因子、土壤养分和水分有效性等自然因素的影响较大,中高山地区的植被主要受降水及人类活动的影响;而岩溶峡谷区植被变化的影响以气候因子为主导,断陷盆地区植被主要受人类活动及社会经济条件的影响,岩溶槽谷区植被变化受水分有效性影响显著。因此,影响西南喀斯特地区植被变化的主导因素在空间上具有显著的区域差异性,不同喀斯特地貌类型间植被变化主导因素差异较大。

3 讨论

西南喀斯特区域具有复杂的地质背景,高度的景观异质性,复杂的二元水文系统,特有的植被种类和高强度的人类活动,这些复杂的环境背景决定了植被变化的空间差异性和影响植被变化的影响因子的多样性和复杂性。本研究揭示了受地质背景制约的西南喀斯特地区植被在气候变化和人类活动等作用下植被变化的主导因素及由于区域背景条件差异导致的主导因素变化的空间非平稳性。

从全局看,黔东、桂东南及云南地区的岩溶断陷盆地等地区,主要受气候因素的影响,热量因子与植被覆盖呈负相关关系。近年来喀斯特地区植被覆盖变化呈上升趋势,但 2001—2011 年西南喀斯特地区呈干旱化趋势[21],而该区年降水量在 800mm 以上,所以降水减少并不能导致植被发生干旱胁迫[3],喀斯特地区干旱化可能是由于气温升高导致蒸散增加所致,这与王兆礼等[22]研究的中国西南喀斯特区域 NDVI 与 SPEI 呈负相关结论一致。云贵高原东南部及其与广西盆地的过渡地带石漠化问题严重,地表植被遭到严重破坏,随着大

规模生态工程的实施,植被覆盖逐渐增加。但由于实施时间相对较短,大部分恢复区域多处于植被恢复初期,以草灌为主,加上复杂的地质背景,植被覆盖变化影响因素复杂,受气候因素、社会经济条件、土壤状况及人类活动干扰的共同作用(图 6)。

不同喀斯特地貌类型条件下,植被变化的主导因素存在显著的空间非平稳性,与不同地貌类型的水文地质特征密切相关。峰林平原区(图 6Ⅰ)地形相对较为平坦、交通条件好、社会经济活动频繁,植被变化受社会经济条件的影响较大。峰丛洼地区(图 6Ⅱ)水热条件相对较好,生态工程实施以来植被增长显著,但仍存在不合理人类活动干扰,植被变化受气候因素及人类活动的共同影响显著;同时,由于该区土地资源分散和典型二元水文地质结构,地表水系缺乏,部分地区植被变化也受水分有效性及土壤养分的影响。喀斯特高原区(图 6Ⅵ)云雾多、日照少、太阳辐射能量低,海拔落差较大,该区植被变化受气候因子、土壤养分和水分有效性等自然因素的影响较大。中高山地区(图 6Ⅳ)山高坡陡,自然条件较差,局部水资源匮乏,植被变化主要受降水及人类活动的影响。岩溶峡谷区(图 6Ⅴ)以典型的中亚热带山区气候和南亚热带干热河谷为特征,植被变化的影响以气候因子为主导。断陷盆地区的盆地内(图 6Ⅶ)地形平坦、光热条件好、人类活动频繁,而四周为山地、地形变化大,植被变化主要受人类活动及社会经济条件的影响。岩溶槽谷区(图 6Ⅷ)具有一定厚度的土层分布,水土资源条件较好,土地承载能力相对较高,但该区地质构造复杂,常出现“悬挂式”地下河,地表水系缺乏,植被变化受水分有效性影响显著。

人类活动对植被增长具有双重作用,并通过土地利用方式反映对生态环境的影响程度。一方面,喀斯特地区石漠化是在典型的生态环境脆弱区,高强度人类活动干扰导致喀斯特植被破坏、甚至土地石漠化的现象[23]。另一方面,生态保护与建设工程措施促进了植被覆盖的增加,Tong 等[2]剔除气象因素对植被变化的影响分析了黔滇桂地区人类活动对植被的干扰,发现生态工程对植被恢复的正向作用。然而,由于不同地理位置自然条件、地质背景和干扰方式及强度等方面的差异,退耕还林、石漠化治理等生态工程成效具有空间差异性,李昊等[3]对贵州毕节地区的退耕还林工程效果进行评估发现退耕还林等生态工程的实施加快了喀斯特地区植被恢复和生态重建,但赫章、大方等喀斯特地区在巨大的人口压力下,仍存在较为严重的植被退化现象。因此,喀斯特地区生态建设与保护是一项长期而艰巨的任务,综合考虑植被变化主导因素的区域差异来调整或改进不同喀斯特区域背景条件下生态工程的措施,促进喀斯特地区生态环境的恢复。

4　结论

本研究采用长时间序列遥感数据,综合运用空间自相关分析、PCA 和 GWR 等研究方法,分析生态工程实施以来滇桂黔喀斯特植被变化及其主要影响因素的空间非平稳性。研究表明近 30 年来滇桂黔三省植被总体呈增加趋势,生态工程的实施加快了西南三省植被覆盖的恢复速率,但不同区域、特别是不同喀斯特地貌类型区植被覆盖变化存在显著的空间差异性。植被变化的空间差异性主要是气候、土壤、地形和人类活动等因素引起的,影响植被变化的主导因素随地理位置的变化而不同,具有显著的空间非平稳性。

喀斯特地区自然条件优越,但复杂的坡度等地形条件叠加高强度的人类活动干扰使生态环境严重退化。由于其独特的地质背景,生态工程实施难度大。因此,加大生态工程投入,完善生态工程措施,在具体实施过程中要综合考虑影响植被生长的影响因素以及不同地貌类型区主导因素的空间差异,对不同工程区进行科学规划与优化分区,因地制宜采取生态移民、退耕还林(还草)、石漠化治理等工程,提高生态工程效率,实现生态效益最大化。

参考文献(References):

[1] Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping. Ecological engineering, 2013, 54: 245-253.

[2] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. International Journal of Applied Earth Observation and

Geoinformation, 2017, 54: 105-113.
[3] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 陈琼, 严祥. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例. 生态学报, 2011, 31(12): 3255-3264.
[4] 童晓伟, 王克林, 岳跃民, 廖楚杰, 徐艳芳, 朱海涛. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应. 生态学报, 2014, 34(12): 3425-3434.
[5] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983~1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.
[6] 王娟, 李宝林, 余万里. 近 30 年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 132-138.
[7] 赵芳. 三江源区草地 MODIS 植被指数时空变异及驱动因子分析[D]. 西宁: 青海大学, 2012.
[8] 李小文, 曹春香, 常超一. 地理学第一定律与时空邻近度的提出. 自然杂志, 2007, 29(2): 69-71.
[9] 高凯, 周志翔, 杨玉萍. 长江流域土地利用结构及其空间自相关分析. 长江流域资源与环境, 2010, 19(S1): 13-20.
[10] 凡非得, 王克林, 宣勇, 岳跃民. 西南喀斯特区域生态环境敏感性评价及其空间分布. 长江流域资源与环境, 2011, 20(11): 1394-1399.
[11] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 宣勇, 张伟, 岳跃民. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征. 生态学报, 2011, 31(21): 6353-6362.
[12] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.
[13] Tong X W, Wang K L, Brandt M, Yue Y M, Liao C J, Fensholt R. Assessing future vegetation trends and restoration prospects in the karst regions of southwest China. Remote Sensing, 2016, 8(5): 357-357.
[14] 茆三芹, 基于 GWR 模型的耕地利用时空演变及驱动因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
[15] 王景雷, 康绍忠, 孙景生, 陈智芳. 基于 PCA 和 GWR 的作物需水量空间分布估算. 科学通报, 2013, 58(12): 1131-1139.
[16] 高吉喜, 段飞舟, 香宝. 主成分分析在农田土壤环境评价中的应用. 地理研究, 2006, 25(5): 836-842.
[17] 王宇航, 赵鸣飞, 康慕谊, 左婉怡. 黄土高原地区 NDVI 与气候因子空间尺度依存性及非平稳性研究. 地理研究, 2016, 35(3): 493-503.
[18] 覃文忠, 王建梅, 刘妙龙. 地理加权回归分析空间数据的空间非平稳性. 辽宁师范大学学报:自然科学版, 2005, 28(4): 476-479.
[19] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. Geographical analysis, 1996, 28(4): 281-298.
[20] 王旭,林征,张志,李丹. 基于 GWR 模型的北极滨海平原融冻湖表面温度空间分布模拟. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(7): 918-924.
[21] 谷晓平, 黄玫, 季劲钧, 吴战平. 近 20 年气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响. 自然资源学报, 2007, 22(2): 251-259.
[22] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 钟睿达, 黄文炜. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变. 农业工程学报, 2016, 32(14): 177-186.
[23] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.